На правах рукописи

ЕФИМОВ Антон Викторович

КОЛЕБАНИЯ, СИНХРОНИЗАЦИЯ И ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ СТРУКТУРЫ В АНСАМБЛЯХ ВЕРОЯТНОСТНЫХ КЛЕТОЧНЫХ АВТОМАТОВ

01.04.03 — радиофизика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Саратов — 2010

Работа выполнена на кафедре радиофизики и нелинейной динамики Саратовского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского.

Научный руководитель:	доктор физико-математических наук, доцент Шабунин Алексей Владимирович.
Официальные оппоненты:	доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Прохоров Михаил Дмитриевич;
	кандидат физико-математических наук, доцент Купцов Павел Владимирович.
Ведущая организация:	Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

Защита состоится 24 сентября 2010 года в 17 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д.212.243.01 при Саратовском государственном университете им. Н.Г. Чернышевского по адресу: 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83, корп. 3, ауд. 34.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Саратовского государственного университета.

Автореферат разослан "___" августа 2010г.

Ученый секретарь

диссертационного совета: Аникин В.М.

Общая характеристика работы

Актуальность работы.

Ансамбли регулярных и хаотических осцилляторов — традиционные объекты исследования для радиофизики. Подобные системы могут демонстрировать целый ряд многообразных физических явлений: захват частот и фаз колебаний, амплитудную «смерть», образование пространственных и пространственно-временных структур, мультистабильность, хаотическую и стохастическую синхронизацию и др. В большинстве работ в качестве парциального элемента ансамбля рассматривается детерминированный осциллятор, описываемый либо системами обыкновенных дифференциальных уравнений, либо отображениями последования. Фазовое пространство таких систем является непрерывным. Однако в природе и технике важную роль играют также и системы с дискретным набором состояний. Например, молекулы, претерпевающие превращения в ходе химических реакций, взаимодействующие элементарные частицы, логические элементы в цифровой электронике, абоненты дискретных сетей передачи информации и др. Для изучения таких систем нужны соответствующие модели, учитывающие их дискретный характер. Примером таких моделей могут служить вероятностные клеточные автоматы (ВКА).

ВКА — это совокупность узлов или клеток решётки, состояние каждой из которых описывается конечным набором дискретных переменных. В зависимости от состояний узла и его ближайших соседей, в соответствии с неким локальным вероятностным правилом, одинаковым по всей решётке, клетки автомата могут изменять свои состояния в дискретном времени. Правила, по которым осуществляются переходы, а также топология связей между отдельными узлами определяют эволюцию ВКА. Она может рассматриваться как на микроуровне (в виде зависимости состояний всех узлов от времени), так и на макроуровне (как временная зависимость усредненных концентраций узлов, находящихся в том или ином состоянии). В последнем случае мы можем наблюдать временные реализации для средних концентраций, по свойствам аналогичные временным реализациям переменных в динамических системах. Главным отличием клеточных автоматов (КА), в том числе ВКА, от динамических моделей является их принципиальная дискретность по времени, пространству и по значениям переменных, а также то, что для построения КА не нужно знать оператора эволюции всей системы — достаточно сформулировать локальные правила взаимодействия на уровне клеток автомата и убедиться в их соблюдении по всей решётке.

Клеточные автоматы были предложены американскими математиками Дж. фон Нейманом и С. Уламом в конце сороковых годов прошлого столетия в качестве возможной идеализации процессов биологического самовоспроизводства. Они позволяют естественным образом учитывать дискретность состояний и случайный характер элементарных взаимодействий частиц в самоорганизующихся системах, без построения сложных стохастических уравнений. Впоследствии, КА получили свое применение в целом ряде областей: для описания фазовых переходов в физико-химических системах (Чен и др.); анализа автомобильного трафика (Пощел, Фраунд); моделирования коллективного движения живых организмов (Дойч); решения задач термодинамики и описания процессов перколяции (Стаоуффер, Биндер); для определения характеристик парольной защиты в информационных системах (Бажухин, Горбунов). Разновидности клеточных автоматов использовались для исследования процессов в электронных и радиотехнических устройствах (Короновский, Храмов, Анфиногентов).

Работы по исследованию пространственно-временной динамики различных типов ВКА ведутся, начиная с середины семидесятых годов прошлого века. Было обнаружено, что они могут демонстрировать такие явления, как образование пространственных структур (в том числе — фрактальных), локальные колебания отдельных участков решётки и глобальные колебания всего ансамбля, распространение волн и волновых фронтов, синхронизацию колебаний, а также разного рода бифуркационные явления (Малинецкий, Бёрд, Гранер, Капрал, Провата, Барас, Николис, Пирсон, Малек Мансур, Третьяков, Ванаг, Морелли, Вуд, Линденберг, Куперман и многие другие).

Среди множества видов ВКА существует класс систем, наиболее близкий по своим свойствам к осцилляторам. Это клеточные автоматы, в которых переходы между состояниями клеток-частиц происходят по циклическому закону. Если при этом наличие в узле определённого состояния способствует появлению такого же состояния в соседних узлах автомата, то такие системы хорошо описывают автокаталитические химические реакции, взаимодействие «хищник–жертва» в экологии, системы передачи информации в цифровых сетях и т.п. Применение методов среднего поля позволяет получить для таких систем дифференциальные уравнения, подобные уравнениям консервативного осциллятора Лотки–Вольтерра. Поэтому в литературе подобные системы называют решёточными моделями Лотки-Вольтерра (Lattice Lotka–Volterra, LLV).

Исследование ансамблей ВКА с циклической сменой состояний обнаружило, что при локальной связи между элементами такие системы демонстрируют стохастические колебания малой амплитуды, характеристики которых не зависят от начальных условий, что расходится с динамикой модели среднего поля. Данное расхождение было отмечено во множестве работ (Провата, Мобилиа, Николис и др.). Было предложено объяснение данному несоответствию: эволюция ВКА приводит к появлению сильно-неоднородного пространственного распределения частиц — формированию пространственных кластеров, что нарушает условие применимости метода среднего поля. Если это предположение верно, то наличие факторов, разрушающих пространственную неоднородность, таких как сильная диффузия или перемешивание, должно привести к консервативной динамике ансамбля. В этом случае использование осциллятора Лотки–Вольтерра для моделирования колебательных процессов в ансамблях с локальными взаимодействиями при наличии диффузии или перемешивания (например, в экологических системах типа «хищник–жертва») является оправданным. Однако детальной проверки этой гипотезы сделано не было.

При исследовании колебаний в ансамблях ВКА с циклической сменой состояний многими авторами рассматривались вопросы пространственных корреляций и синхронизации колебаний (Вуд, Линденрберг, Шабо, Куперман, Мобилиа и др.). В работах Мобилиа было обнаружено, что синхронизация колебаний в таких системах возникает при наличии глобальной связи между частицами. Однако взаимодействие в большинстве реальных систем происходят локально. Возможна ли синхронизация колебаний в двумерных ВКА при локальных связях между элементами? Какие процессы могут быть ответственны за возникновение такой синхронизации? Можно ли в подобных системах наблюдать классическое явление захвата мгновенных фаз колебаний, характеризующее синхронизацию динамических осцилляторов? Данные вопросы оставались нерешёнными.

Исследования последних лет показывают, что между поведением ансамблей вероятностных клеточных автоматов типа решёток Лотки–Вольтерра и динамикой детерминированных автоколебательных систем существует много общего. Однако некоторые вопросы, связанные с подобным сопоставлением, остались невыясненными.

Цель диссертационной работы: выявление типичных закономерностей в процессах образования пространственных структур и синхронизации колебаний в стохастических решёточных моделях Лотки–Вольтерра, построенных на базе вероятностных клеточных автоматов, и определение роли диффузии и перемешивания в их пространственно-временной динамике.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие **основные задачи:**

1. Разработать пакет программного обеспечения для численного исследования решёточных систем Лотки–Вольтерра методом Монте-Карло с учётом явлений диффузии и перемешивания.

2. Произвести численный эксперимент по моделированию динамики ансамблей частиц с разным количеством возможных состояний при различных параметрах и размерах ансамбля. Провести детальный анализ образующихся пространственно-временных структур, выявить статистические закономерности процессов образования пространственных кластеров и определить их влияние на колебания в системе.

3. Построить модель среднего поля и произвести её аналитические и численные исследования, сравнить результаты анализа с результатами моделирования динамики ансамбля методом Монте-Карло.

4. Изучить влияние перемешивания и диффузии на локальную динамику ансамбля и на глобальные колебания средних концентраций.

5. Исследовать возможность синхронизации локальных колебаний на поверхности решётки. Рассмотреть динамику разности мгновенных фаз колебаний для разных участков ансамбля. Определить, сопровождается ли самоорганизация в системе явлением фазовой синхронизации локальных колебаний, и, при наличии этого явления, произвести его анализ в зависимости от интенсивности связи и расстройки подсистем по параметрам.

Научная новизна результатов работы.

1. Впервые проведён детальный анализ характеристик пространственных структур, образующихся в решёточных системах Лотки–Вольтерра.

2. Впервые обнаружено, что для исследуемых систем законы распределения кластеров по размерам различны для решёток малого и большого размера. Показано, что для решёток малого размера характерно распределение по степенному закону, в то время как в больших решётках присутствует экспоненциально спадающая зависимость.

3. Впервые показано, что перемешивание частиц ансамбля ВКА может приводить к рождению регулярных глобальных колебаний средних концентраций. Обнаружено, что рождение глобальных колебаний происходит аналогично суперкритической бифуркации Андронова–Хопфа в автоколебательных динамических системах.

4. Впервые показано, что локальные колебания в ансамбле ВКА могут демонстрировать явление фазовой синхронизации, аналогично динамическим осцилляторам. Показано, что разрушение синхронизации при уменьшении управляющего параметра происходит через этап частичной фазовой синхронизации.

Достоверность научных выводов работы.

Решение поставленных в диссертации задач проводится методами численного эксперимента и, частично, аналитически. Достоверность полученных результатов подтверждается воспроизводимостью всех экспериментальных данных, соответствием результатов тестовых исследований и результатов, полученных другими авторами, использованием стандартных, общепринятых алгоритмов, согласованностью с данными, представленными в научной литературе.

Положения и результаты, выносимые на защиту:

1. В двумерном пространстве решёточных моделей Лотки–Вольтерра, построенных на базе вероятностных клеточных автоматов, формируются однородные кластеры. Наблюдаемые в системе колебания концентраций частиц являются результатом взаимодействий, протекающих на границах кластеров. Характеристики колебаний определяются формой, структурой и количеством взаимодействующих кластеров.

2. Нелокальное перемешивание взаимодействующих частиц существенно меняет поведение ансамбля, разрушая локальную упоря-

доченность в пространственном распределении частиц в виде однородных кластеров. При превышении параметром, характеризующим интенсивность перемешивания, порогового значения, наблюдается возникновение периодических колебаний средних концентраций частиц, аналогичное бифуркации Андронова–Хопфа в диссипативных динамических системах.

3. В основе возникновения глобальных колебаний концентраций лежит явление фазовой синхронизации между локальными колебаниями на отдельных участках решетки, которое сохраняется и при расстройке подсистем по параметрам. Интенсивность перемешивания играет в этом процессе роль параметра связи: его постепенное увеличение ведет сначала к частичной фазовой синхронизации, когда разность мгновенных фаз, оставаясь захваченной на конечных интервалах времени, медленно дрейфует к бесконечности, а затем к полной фазовой синхронизации.

Научно-практическая значимость результатов

Научные результаты, представленные в диссертационной работе, развивают и дополняют фундаментальные представления современной теории колебаний и теории динамических систем, распространяя их на ансамбли вероятностных клеточных автоматов. Они демонстрируют универсальность явления фазовой синхронизации колебаний, показывая, что оно реализуется не только в автоколебательных системах, но и в стохастических системах с дискретным фазовым пространством. Результаты проведённых исследований определяют границы применимости динамических моделей среднего поля типа Лотки–Вольтерра для описания систем класса «хищник – жертва» самой различной природы. Они открывают возможность управления поведением систем данного класса, что может иметь практическое значение для автокаталитических реакций в химии, динамики популяций в биологии, сетей передачи цифровой информации в радиоэлектронике и для других областей.

Апробация работы и публикации.

Основные результаты работы были представлены на следующих научных конференциях:

- Международная научная конференция «Synchro – 2002» (Саратов, 2002),

- Научная школа-конференция «Нелинейные дни в Саратове для молодых» (Саратов, 2003),
- Международная школа-конференция «Хаотические автоколебания и образование структур» (ХАОС – 2004) (Саратов, 2004),
- Международная студенческая конференция «Студент и научно-технический прогресс» (Новосибирск, 2004),
- Международная научная конференция «Dynamics at the Mesoscale: Theory, Modelling and Experiments» (Франция, Лион, 2004),
- Научная школа-конференция «Нелинейные дни в Саратове для молодых» (Саратов, 2005),
- Международная научная школа-конференция «Нелинейные волны – 2006» (Нижний Новгород, 2006),
- Международная конференция «Pan-REC» (Томск, 2006),
- Международная научная конференция «Ломоносов – 2006» (Москва, 2006),
- Международная научная конференция «Physics and Control» (PhysCon – 2008) (Санкт-Петербург, 2008),
- Научная школа-конференция «Нелинейные дни в Саратове для молодых» (Саратов, 2009),

а также на научных семинарах кафедры радиофизики и нелинейной динамики СГУ, центра нелинейной динамики и биофизики при СГУ, института физической химии национального научного центра республики Греция «Demokritos» (Греция, Афины).

Личный вклад автора.

Все результаты диссертации получены лично соискателем. В исследованиях, представленных в первых двух частях второй главы, соискателю принадлежит постановка задачи. Постановка задач в остальной части работы осуществлялась совместно с научным руководителем. Автор принимал активное участие в анализе, обсуждении и представлении всех результатов.

Структура и объем работы.

Материалы диссертации изложены на 156 страницах, содержат 47 рисунков и список цитированной литературы из 132 наименований. Диссертационная работа состоит из введения, двух глав, заключения, списка цитируемой литературы и списка публикаций по теме диссертации.

Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность работы, определяются цели исследования, ставятся основные задачи, раскрывается научная новизна полученных результатов и формулируются положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** с помощью методов нелинейной динамики проводится исследование ансамблей стохастических частиц с дискретным фазовым пространством на одномерной и двумерной решётке, проводится анализ формирующихся на решётке пространственных структур. Моделирование взаимодействий производится методом Монте-Карло, который является разновидностью вероятностного клеточного автомата. Рассматривается два вида клеточных автоматов:

- с тремя возможными состояниями ячеек, сменяющими друг друга по циклическому закону:

$$X + Y \overset{k_1}{\to} 2Y,\ Y + S \overset{k_2}{\to} 2S,\ S + X \overset{k_3}{\to} 2X \tag{1}$$

- и с пятью состояниями:

$$\begin{gathered} X + Y \overset{k_1}{\to} 2Y,\ Y + Z \overset{k_2}{\to} 2Z,\ Z + U \overset{k_3}{\to} 2U, \\ U + S \overset{k_4}{\to} 2S,\ X + S \overset{k_5}{\to} 2X, \end{gathered} \tag{2}$$

где X, Y, Z, U, S — виды (состояния) взаимодействующих частиц, k_i — кинетические константы, задающие относительные скорости превращений. При моделировании решётка сначала равномерно заполняется частицами в соответствии с выбранными начальными концентрациями. Затем на каждом микрошаге алгоритма случайным образом выбирается ячейка решётки и одна из её ближайших соседей. В зависимости от того, в каких состояниях находятся выбранные ячейки, может осуществиться один из указанных переходов с вероятностью, пропорциональной соответствующей кинетической константе $p_i = k_i/max\,\{k_1...k_N\}$. Данный алгоритм позволяет моделировать пространственно-временную динамику решётки, на основе которой, посредством усреднения по пространству взаимодействия, можно получить, например, временную зависимость для средней концентрации состояний X: $x(t) = X_M(t))/M$, где t — дискретное время, $X_M(t)$ — общее число частиц X на решётке в момент t, M — количество узлов решётки). Результаты моделирования методом Монте-Карло сопоставляются с результатами метода среднего поля, который как схемы (1), так и для схемы (2), ведет к уравнениям консервативного осциллятора. Для ВКА с тремя состояниями система дифференциальных уравнений выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= -k_1xy + k_3x(1-x-y),\\ \dot{y} &= k_1xy - k_2y(1-x-y),\end{aligned}$$

где x и y — средние концентрации частиц X и Y, соответственно.

Устанавливается, что в процессе взаимодействия на поверхности решёток образуются фрактальные структуры из одинаковых частиц — кластеры. Законы распределения кластеров по размерам различны для решёток разного размера. Для малых решёток (менее 20 тыс. ячеек) характерно распределение по степенному закону, в больших решётках в закон распределения добавляется экспоненциально спадающая зависимость, что говорит о двух процессах одновременно протекающих в пространстве системы: формировании и взаимодействии кластеров в малом пространственном масштабе и перемешивании и суперпозиции несинхронных колебаний локальных осцилляторов в больших масштабах. Следствием этого являются стохастические колебания концентраций в малых локальных областях, интенсивность которых в масштабах всей решётки в термодинамическом пределе стремится к нулю. Характеристики локальных колебаний полностью определяются формой, структурой и количеством кластеров.

Исследования показывают, что колебания в ансамбле ВКА качественно отличаются от колебаний консервативного осциллятора. В системе наблюдается переходные колебания и выход к стационарному состоянию. Поведение траекторий в окрестности этого состояния, указывает, что оно соответствует устойчивому фокусу в диссипативных динамических системах. После переходного процесса колебания средних концентраций представляют собой случайные флуктуации малой амплитуды вокруг стационарного состояния. Расположение стационарного состояния в «фазовом пространстве» совпадает с координатами состояния равновесия типа центр в модели среднего поля.

Вторая глава посвящена исследованию влияния перемешивания и диффузии на динамику рассмотренных в первой главе систем. Для того, чтобы задать процессы диффузии и перемешивания, определяется, что частицы могут случайным образом перемещаться по решётке. В случае локальной диффузии это перемещение происходит в виде обмена состояниями между соседними узлами, а в случае перемешивания обмен может происходить между любыми частицами ансамбля.

В результате проведённых исследований устанавливается, что локальная диффузия увеличивает характерный пространственный масштаб системы и приводит к увеличению изрезанности границ кластерных структур. Как следствие, растёт число ячеек решётки, состояния которых меняются на каждой итерации алгоритма, что означает ускорение всех процессов и уменьшение среднего временного масштаба колебаний, а также приводит к росту регулярности и интенсивности колебаний. Выявлено, что зависимость дисперсии колебаний от параметра диффузии носит линейный возрастающий характер для малых значений параметра ($D < 20$) и становится нелинейной при его увеличении. При достижении параметром диффузии некоторого порогового значения, зависящего от размера решётки и кинетических параметров исходной схемы, решётка полностью заполняется одним из состояний, а колебания прекращаются. Угол наклона линейного участка зависимости дисперсии от параметра D определяется набором кинетических констант и размером решётки.

Вторая часть главы посвящена исследованию влияния на систему внешнего перемешивания, представляющего из себя разновидность нелокального диффузионного процесса. Показано, что рост степени перемешивания приводит к бифуркационному рождению глобальных колебаний в исследуемых системах при превышении параметром перемешивания критического значения. На основании изменения формы спектров мощности колебаний при увеличении пространственных размеров системы делается вывод о том, что данные колебания можно считать периодическими в предельном случае решётки бесконечного размера. Увеличение перемешивания влечёт за собой линейный рост интенсивности колебаний. Механизм появления глобальных колебаний схож с бифуркацией Андронова–Хопфа в динамических системах. При увеличении параметра перемешивания зашумлённый «предельный» цикл, соответствующий колебаниям усреднённых концентраций в пространстве переменных системы, «влипает» в контур, образованный инвариантными многообразиями седловых точек из модели среднего поля. После этого система приходит в стационарное состояние.

Рождение близких к периодическим глобальных колебаний при воздействии на систему внешнего нелокального перемешивания происходит благодаря фазовой синхронизации между отдельными участками решётки. При последовательном увеличении перемешивания разность мгновенных фаз двух локальных осцилляторов сначала совершает броуновское движение во времени, затем появляются интервалы фазового захвата, чередующиеся с интервалами «проскальзывания» фазы, и, наконец, разность фаз оказывается ограниченной на протяжении всего процесса. Также показано, что фазовая синхронизация под действием перемешивания наблюдается в исследуемых моделях и в случае слабой неидентичности подсистем. Построенная на плоскости параметров «расстройка – перемешивание» область синхронизации локальных колебаний имеет вид, аналогичный «языкам синхронизации» в динамических системах.

В результате проведённых исследований делается вывод о том, что стохастические решёточные модели Лотки–Вольтерра с дискретным фазовым пространством, описывающие широкий класс взаимодействий типа «хищник – жертва» на поверхности, в термодинамическом пределе могут демонстрировать типичное для динамических систем поведение: рождение периодических колебаний через бифуркацию Андронова–Хопфа и фазовую синхронизацию как идентичных, так и слабонеидентичных подсистем.

В **заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы.

Основные результаты и выводы:

1. Поведение ансамблей ВКА с циклическим переходами между состояниями существенно отличается от поведения динамической системы, полученной в приближении среднего поля. Это отличие проявляется как для трехкомпонентной, так и для пятикомпонентной сред. Колебания средних концентраций частиц ансамбля схожи с колебаниями диссипативных динамических систем, в то время как модель среднего поля представляет собой уравнение консервативного осциллятора.

2. Одинаковые частицы образуют на поверхности двумерной решётки фрактальные структуры — кластеры. Наблюдаемые в системе колебания концентраций состояний являются результатом взаимодействий на границах кластеров. Характеристики колебаний определяются формой, структурой взаимодействующих кластеров и их количеством.

3. Законы распределения кластеров по размерам различны для решёток малого и большого размера. Для решёток малого размера характерно распределение по степенному закону, в то время как в больших решётках к степенному закону распределения кластеров добавляется экспоненциально спадающая зависимость. Такой вид распределения в больших решётках свидетельствует об одновременном протекании на поверхности двух процессов: процесса формирования и взаимодействия кластеров в малом пространственном масштабе и суперпозиции несинхронных колебаний в различных частях решётки в больших масштабах.

4. Добавление внешнего перемешивания в систему приводит к синхронизации колебаний различных областей решётки, что в свою очередь ведёт к росту амплитуды и регулярности глобальных колебаний в системе. В зависимости от степени перемешивания можно наблюдать аналог бифуркации Андронова–Хопфа, реализующейся в динамических системах, в результате которой рождается зашумлённый устойчивый «предельный цикл». Амплитуда «предельного цикла» растёт с увеличением параметра перемешивания, пока значения средних концентраций не выходят за рамки пороговых значений, соответствующих в модели среднего поля инвариантным многообразиям, образующим в фазовом пространстве замкнутый контур. После этого колебания в системе прекращаются, а поверхность решётки оказывается заполненной одним видом частиц, что означает переход системы в стационарное состояние.

5. При добавлении в систему сильного перемешивания пространственные кластеры разрушаются и все компоненты оказываются равномерно распределенными по решётке. Несмотря на это, поведение системы не совпадает с динамикой модели среднего поля, а соответствует поведению диссипативных динамических систем.

6. Локальная диффузия приводит к увеличению изрезанности границ кластеров. Как следствие, растёт интенсивность процессов взаимодействия между частицами, что приводит к росту регулярности и интенсивности колебаний. Зависимость дисперсии колебаний от параметра диффузии D носит линейный возрастающий характер для малых значений параметра ($D \lesssim 20$) и становится нелинейной при его увеличении. При достижении параметром диффузии некоторого порогового значения, зависящего от размера решётки и кинетических параметров исходной схемы, решётка полностью заполняется одинаковыми частицами, а колебания прекращаются. Угол наклона линейного участка зависимости $\sigma_x{}^2(D)$ определяется набором кинетических констант и размером решётки.

7. Рождение периодических глобальных колебаний числа частиц, происходящее при увеличении перемешивания, сопровождается фазовой синхронизацией между колебаниями в отдельных областях решётки. Интенсивность перемешивания играет роль параметра связи: при его последовательном увеличении происходит постепенный переход от полностью несинхронных колебаний к полностью синхронным. При слабом перемешивании разность мгновенных фаз двух локальных осцилляторов совершает броуновское движение во времени. При увеличении связи появляются интервалы фазового захвата, чередующиеся с интервалами «проскальзывания» фазы, и, наконец, при достижении порогового значения, разность фаз оказывается ограниченной на протяжении всего процесса.

8. Фазовая синхронизация под действием перемешивания наблюдается как в однородном ансамбле, так и в ансамбле с пространственно-неоднородным распределением параметров. Область синхронизации, построенная на плоскости «расстройка – степень перемешивания» имеет вид, качественно схожий с «языками синхронизации», типичными для динамических систем.

Список публикаций по теме диссертации

1. Efimov A., Shabunin A., Astakhov V. and Provata V., "Chaotic dynamics of chemical reactions in low dimensional substrates: Mean-Field and Monte Carlo approaches" // Изв. вузов Прикладная нелинейная динамика, 2003, Т. 11, № 2, С. 72.
2. Shabunin A.V., Efimov A.V., Tsekouras G.A. and Provata A., "Scaling, cluster dynamics and complex oscillations in a multispecies Lattice Lotka-Volterra model" // Physica A, 2005, V. 347, P. 117.
3. Ефимов А.В., Шабунин А.В., "Формирование и развитие пространственных структур в системе химических реакций на каталитической решётке: моделирование методом Монте-Карло" // Изв. вузов Прикладная нелинейная динамика, 2006, Т. 14, № 2, С. 47.
4. Efimov A., Shabunin A. and Provata A., "Synchronization of stochastic oscillations due to long-range diffusion" // Physical Review E, 2008, V. 78, № 5, P. 056201.
5. Ефимов А.В., Шабунин А.В., "Влияние перемешивания и диффузии на пространственно-временную динамику в стохастической системе

Лотки-Вольтерры с дискретным фазовым пространством" // Изв. вузов Прикладная нелинейная динамика, 2009, Т. 17, № 1, С. 57.
6. Shabunin A. and Efimov A., "Lattice Lotka–Volterra model with long range mixing" // The European Physical Journal B, 2008, V. 65, № 3, P. 387.
7. Ефимов А.В., Шабунин А.В., "Хаотическая динамика химических систем в пространстве низкой размерности" // Труды научной студенческой конференции физического факультета СГУ, изд. Саратовского университета, 2003, С. 9.
8. Ефимов А.В., "Анализ динамики каталитических реакций на поверхности методом Монте-Карло" // Материалы научной школы-конференции "Нелинейные дни в Саратове для молодых — 2003", изд. ГосУНКЦ "Колледж", 2003, С. 278.
9. Ефимов А.В., "Компьютерное моделирование динамики химически активных сред" // Труды научной студенческой конференции физического факультета СГУ, изд. Саратовского гос. университета, 2004, С. 21.
10. Ефимов А.В., "Анализ динамики химических реакций на поверхности катализатора методом Монте-Карло" // Материалы XLII Международной Научной Студенческой Конференции "Студент и научно-технический прогресс", Физика: Новосибирский гос. ун-тет, 2004, С. 228.
11. Ефимов А.В., Шабунин А.В. "Синхронизирующее влияние внешнего перемешивания на динамику ансамбля стохастических осцилляторов в системе (4+1)–Lattice Lotka–Volterra" // Материалы научной школы-конференции "Нелинейные дни в Саратове для молодых — 2005", изд. ГосУНКЦ "Колледж", 2005, С. 96.
12. Shabunin A., Efimov A., Provata A. "Chaotic dynamics of chemical reactions in low dimensional substrate: Mean-Field and Monte-Carlo approaches" // Abstracts of International conference "Synchronization of chaotic and stochastic oscillations", Saratov, Russia, 2002, P. 53.
13. Ефимов А.В., "Анализ динамики химических реакций на поверхности катализатора методом Монте-Карло" // Труды XLII Международной Научной Студенческой Конференции "Студент и научно-технический прогресс", Новосибирский гос. ун-тет, 2004, С. 100.
14. Ефимов А.В., Шабунин А.В. "Процессы кластерообразования в химически активных средах" // Материалы VII международной школы "Хаотические автоколебания и образование структур", изд. ГосУНКЦ "Колледж", Саратов, 1-6 октября, 2004, С. 133.
15. Ефимов А.В., "Синхронизация в ансамбле стохастических осцилляторов в системе (4+1)–Lattice Lotka–Volterra с внешним перемешива-

нием" // Нелинейные волновые процессы: Конференция молодых учёных, Н. Новгород, 1-7 марта, 2006, С. 53.
16. Ефимов А.В., Шабунин А.В. "Влияние внешнего перемешивания на динамику ансамбля стохастических осцилляторов в системе (4+1)–Lattice Lotka–Volterra". Международная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных по фундаментальным наукам "Ломоносов—2006", Физический факультет, Московский государственный университет, Москва, 2006, Т. 2, С. 90.

ЕФИМОВ Антон Викторович

КОЛЕБАНИЯ, СИНХРОНИЗАЦИЯ И ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ СТРУКТУРЫ В АНСАМБЛЯХ ВЕРОЯТНОСТНЫХ КЛЕТОЧНЫХ АВТОМАТОВ

Специальность 01.04.03 — радиофизика

Автореферат